DOI:10.11931/guihaia.gxzw201812045

种子特征和播种深度对辽东栎种子萌发和幼苗生长的影响

张金峰，程继铭，闫兴富*，罗永红，朱雅婷

(国家民委生态系统建模及应用重点实验室 北方民族大学生物科学与工程学院，银川 750021)

摘要：在玻璃温室内的遮阴环境下，采用盆播方法研究了辽东栎种子特征（大小和种皮）和播种深度(0、3、6 和 10 cm)对种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明：辽东栎大种子萌发率、萌发速率、萌发值和萌发指数在所有播种深度均高于小种子，其中非去皮种子萌发率、萌发速率和萌发指数在 0 cm 播种深度的不同大小种子间差异显著，去皮种子所有萌发参数在 6 和 10 cm 播种深度的不同大小种子间均差异显著；去皮可促进大种子萌发，但抑制小种子萌发；不同大小种子所有萌发参数均在 0 cm 播种深度最大，在 10 cm 播种深度最小。不论有无种皮，大种子萌发幼苗的叶片数、单株叶面积、总干质量和根冠比在所有播种深度均大于小种子萌发幼苗；去皮种子萌发幼苗的株高、基茎、叶片数、单株叶面积和总干质量在所有播种深度均不同程度地小于非去皮种子萌发幼苗，但前者根冠比在 0、3 和 6 cm 播种深度大于后者；随着播种深度增大，幼苗株高、叶片数、单株叶面积、总干质量和根冠比等生长参数均呈减小趋势，但基茎随播种深度增大而增大。

关键词： 种子大小，种皮，播种深度，种子萌发，幼苗生长

中图分类号：Q948.1　　**文献标识码：**A

Effects of seed characteristics and sowing depth on the seed germination and seedling growth of *Quercus wutaishanica*

ZHANG Jinfeng, CHENG Jiming, YAN Xingfu*, LUO Yonghong, ZHU Yating

(*Key Laboratory of Ecosystem Modelling and Applications of State Nationalities Affairs Commission*, *College of Biological Science and Engineering*, *Beifang Minzu University*, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Under shading environment of greenhouse, experiments were conducted to investigate the effects of seed characteristics (seed size and seed coat) and different sowing depths (0, 3 , 6, and 10 cm) on the seed germination and seedling growth of *Q. wutaishanica* by utilizing pot

收稿日期：2019-01-18

基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划(2018BEG02001)；国家自然科学基金(31660195) [Supported by the Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region, China (2018BEG02001); the National Natural Science Foundation of China (31660195)]。

作者简介：张金峰(1993—)，男，青海西宁人，硕士生，从事植物生态学研究，(E-mail) 563254919@qq.com。

***通信作者：**闫兴富，男，博士，教授，从事植物生态学和森林培育等领域的研究，(E-mail) xxffyan@126.com。

planting method. The results showed that the germination percentage (GP), germination rate (GR), germination value (GV), and germination index (GI) of large *Q*. *wutaishanica* seeds were higher than those of small seeds at all sowing depths. Significant differences between large and small coated seeds in GP, GR and GI were observed at 0 cm sowing depth, while significant differences between large and small uncoated seeds in all germination parameters were detected at both 6 and 10 cm sowing depths. Peeling could facilitate the germination of large seeds but inhibit the small ones. All germination parameters of seeds of different size maximized at 0 cm sowing depth and minimized at 10 cm sowing depth. Regardless of whether coated or uncoated, leaf number (LN), leaf area per plant (LAPP), total dry mass (TDM), and root-shoot ratio (RSR) of seedlings germinated from large seeds were all higher than those of seedlings from small seeds at all four sowing depths. The shoot height (SH), basal stem diameter (BSD), LN, LAPP, and TDM of seedlings established from uncoated seeds were all lower, to various degrees, than those of seedlings from coated seeds at all sowing depths, while the RSRs of the former were higher than those of the latter at 0, 3, and 6 cm sowing depths. The SH, LN, LAPP, TDM, and RSR of seedlings all exhibited decreasing trends with the increasing of sowing depth. The BSD of seedlings, however, increased with the sowing depth increasing.

Key words: seed size, seed coat, sowing depth, seed germination, seedling growth

种子萌发和出苗是决定植物能否正常完成生活史的关键阶段，种子特征对种子萌发和幼苗建立与存活都具有重要影响，其中种子大小对种子萌发具有重要影响(武高林和杜国祯, 2008)，不同大小种子贮藏营养物质的量差异较大，这种差异直接影响种子萌发和幼苗建立。例如，王晨阳等(2011)研究发现，24 种唇形科植物种子的萌发率和萌发速率指数与种子大小显著负相关；种皮对种子萌发也具有重要影响，种皮的机械束缚作用及种皮内含有的萌发抑制物质都可能限制种子萌发(黄雍容等, 2011)；有研究结果显示，栎属(*Quercus*)植物种皮中的萌发抑制物质可抑制种子萌发，去皮处理对此类种子的萌发具有促进作用(李庆梅, 2013)，锥连栎(*Quercus franchetii*)种子的种皮对萌发具有更明显的抑制作用(余婷等, 2017)。种子萌发受播种深度的影响(宋以刚等, 2015)，过深或过浅播种都会影响种子萌发和出苗(闫兴富等, 2014b; 唐卫东等, 2017)。播种深度对不同植物种子萌发的影响有较大差异，例如，在 2.5 cm 播种深度下异虉草(*Phalaris paradoxa*)种子的萌发率最高(Taylor et al., 2005)，而栓皮栎(*Quercus variabilis*)种子萌发率则在 4 cm 播种深度下达最大值(Guo et al., 2009)，亚利桑那白

栎(*Quercus arizonica*)种子在 15 cm 播种深度下仍具有相对较高的萌发率(Nyandiga & Mcpherson, 1992)。

幼苗能否顺利进入幼树阶段取决与其早期阶段的生长与存活情况，因为种子一旦进入萌发阶段，植物个体即从一生中风险最小的阶段跨入风险最大、且对不良环境反应最为敏感的阶段。种子萌发后能否成功建立幼苗与种子的特征密切相关(武高林和杜国祯, 2008)，大种子萌发建立的幼苗其生长势和对不良环境的抵抗力更强，存活率也更高，生物量显著高于小种子萌发建立幼苗的(Mole & Westoby, 2004)；当然也有研究认为小种子在萌发及其萌发建立幼苗的生长方面都更具优势(杨慧玲等, 2012)。种皮可通过影响种子萌发的进程而对幼苗阶段的生长发育产生影响，有研究结果显示，去皮辽东栎种子萌发幼苗的单株叶面积和总干质量均显著增大(闫兴富等, 2014b)。选择适宜的播种深度是保证种子高萌发率和高出苗率的重要技术措施，适宜的播种深度不仅是降低种子被动物取食风险的保证，同时也为种子萌发后的幼苗生长与存活提供了适宜微生境，例如，适宜的埋藏深度(4 cm)为山杏(*Prunus armeniaca*)种子萌发后建立幼苗的早期生长提供了保证(Guo et al., 2010)，但播种过深可能造成幼苗出土困难(Guo et al., 2009)，甚至导致幼苗死亡(李文婷等, 2010)。因此，在以种子为材料的直播造林和森林更新实践中，掌握适宜的播种深度是保证种子出苗和幼苗建立成功的关键。

辽东栎是我国暖温带落叶阔叶林的重要优势树种之一，以种子为材料的实生更新对维持其遗传多样性和群落结构稳定都具有重要作用。成熟散落后的辽东栎种子易于被啮齿动物和鸟类大量捕食和贮藏而损失，辽东栎种子没有休眠期，在遇到适宜萌发条件的情况下可快速萌发并建立幼苗(孙书存和陈灵芝, 2000)。有研究结果显示，种皮和环境温度(闫兴富等, 2014a)、土壤和调落物埋藏(Zhang & Wang, 2001)等因素对辽东栎种子的萌发都具有重要影响；据闫兴富等(2014b)报道，种皮和播种深度显著影响辽东栎的种子萌发和幼苗生长，但不同大小的辽东栎种子在是否去除种皮和不同播种深度下的萌发及其建立幼苗的生长特点还缺乏研究。因此，本研究以采自宁夏六盘山区的辽东栎种子为材料，在盆播条件下，研究了种子特征(大小和有无种皮)和播种深度对种子萌发和幼苗生长的影响，研究结果可进一步揭示辽东栎种子萌发和幼苗生长对种子特征和播种深度的响应机制，而且可为辽东栎种群的实生更新和直播造林实践及种苗繁育提供参考。

1 材料与方法

1.1 种子的采集

试验用种子于 2016 年 9 月采自六盘山国家级自然保护区(106.9°—106.30°E，35.15°—

35.41 °N)所属秋千架林区的辽东栎林下。拣拾当天散落的辽东栎种子于次日带回实验室，结合手捏和表面观察，挑选不同大小且无虫蛀危害的种子备用，大、小种子鲜重分别为 3.05±0.38 (n = 100)和(1.46±0.27) g (n = 100)。

1.2 试验设计和播种方法

试验场所为北方民族大学生物学实习基地的玻璃温室，温室内的光照强度约为室外自然全光照的 55.4%。自 11 月 1 日温室开始集中供暖，温室内白天约为(23±5) ℃，夜晚温度约为(16±3) ℃，为避免光照过强而造成种子萌发过程中的过度脱水，试验期间用黑色尼龙网眼布(单层)搭建遮阴棚进行适度遮光，遮阴棚内的相对光强约为室外自然全光照的 18.9%。

于 2016 年 9 月 27 日，取高 25 cm、内径 20 cm 的塑料花盆 64 个，平均分为 4 组(每组 16 盆)，分别播种非去皮大种子、非去皮小种子、去皮大种子和去皮小种子；每组的 16 个花盆各分为 4 个小组作为 4 个播种深度处理(分别为 0、3、6 和 10 cm)，每小组的 4 盆作为同一播种深度的 4 次重复。播种前，将花盆装入经过多年种植小麦熟化的风沙土，调节土层至盆口边沿的高度分别至 0、3、6 和 10 cm；花盆浇水后，按每盆播种 30 粒的密度将种子胚根端朝下进行播种，试验用种子总计：2 种皮处理(非去皮、去皮)×2 种子大小(大、小种子)×4 播种深度×4 重复×30 粒=1 920 粒。播种后用湿沙覆盖种子至花盆口，4 个小组花盆的播种深度即分别为 0、3、6 和 10 cm。幼苗出现第一片真叶视为种子已萌发，每隔 2 d 记录萌发种子数量 1 次，记录持续到连续 14 d 不再继续有种子萌发为止。种子萌发后适时对幼苗进行浇水和松土等管理。

1.3 种子萌发参数的计算

以萌发率(germination percentage, *GP*)、萌发速率(germination rate, *GR*)、萌发值(germination value, *GV*)和萌发指数(germination index, *GI*)等参数评价种子活力，分别按下列公式计算上述参数：

GP =试验期间萌发种子数/试验用种子数×100%；

$GR = \sum(100G_i \ / n \times t_i)$

式中，n 和 G_i 分别为每一重复所有用种子数和 t_i 天(t_i = 0，1，2，3…，∞)内萌发种子数；

$GV = MDG \times PV$

式中，MDG (mean daily germination，平均每天萌发的种子数) =试验结束时最终萌发种子/萌发试验总天数，PV (peak value，单日最大种子萌发数) =萌发试验期间单日最大萌发种子数/达最大种子萌发所用天数；

$GI = \sum G_t / D_t$

式中，G_t 和 D_t 分别为时间 t 天内萌发种子数和萌发试验持续的总天数。

1.4 幼苗收获与生长参数的计算

于 2017 年 10 月 30 日，收获各处理组花盆现存幼苗，浇水后连根挖出幼苗，将根和叶片表面泥土用自来水冲洗干净，再用干燥滤纸吸干幼苗表面水珠；测定记录幼苗株高(shoot height，SH)、基茎(Basal stem diameter, BSD)、叶片数(leaf number, LN)和单株叶面积(leaf area per plant, LAPP) (LI-3000 叶面积测定仪测定)。将幼苗根、茎和叶分开分别装入纸袋内，置于 85℃电子恒温干燥箱烘干 48 h 后，1/1000 电子天平称重。根据上述测得数据计算总干质量(total dry mass, TDM)和根冠比(root shoot ratio, RSR) (根干质量与茎叶干质量之比)。

1.5 数据处理

先将所有试验数据进行平方根转换后，用多因素方差分析的方法分析种子大小、种皮和播种深度及其交互作用对种子萌发和幼苗生长参数影响的差异显著性。用最小显著差异法(LSD)分析不同大小种子、有无种皮和不同播种深度间种子萌发和幼苗生长参数的差异显著性；所有数据的统计分析均在 SPSS 21.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 种子大小、种皮和播种深度对种子萌发的影响

种子大小和播种深度对辽东栎种子的所有萌发参数均具有极显著影响，种皮对所有萌发参数均无显著影响；种子大小和种皮间的交互作用显著影响萌发率和萌发值；种子大小和播种深度间的交互作用、种皮和播种深度间的交互作用及三者的交互作用对所有萌发参数均无显著影响(表 1)。

由图 1 可以看出，非去皮大、小种子的萌发率均在 0 cm 播种深度最大，并随播种深度增大逐渐降低，大种子萌发率在所有播种深度均高于小种子，但仅在 0 cm 播种深度差异显著(P<0.05)。大种子去皮后萌发率显著提高(P<0.05)，小种子去皮后萌发率下降，但与非去皮种子间差异不显著，去皮大、小种子萌发率也均随播种深度的增大逐渐降低，其中在 6 和 10 cm 播种深度不同大小种子间差异显著(P<0.05)。不论是否去除种皮，不同大小种子萌发率除在 6 和 10 cm 播种深度间无显著差异外，其他播种深度间均差异显著(P<0.05)。

表 1 种子大小、种皮和播种深度对辽东栎种子萌发影响的多因素方差分析

Tab. 1 Multi-way ANOVA of effects of seed size (SS), seed coat (SC) and sowing depth (SD) on the seed germination of *Quercus wutaishanica*

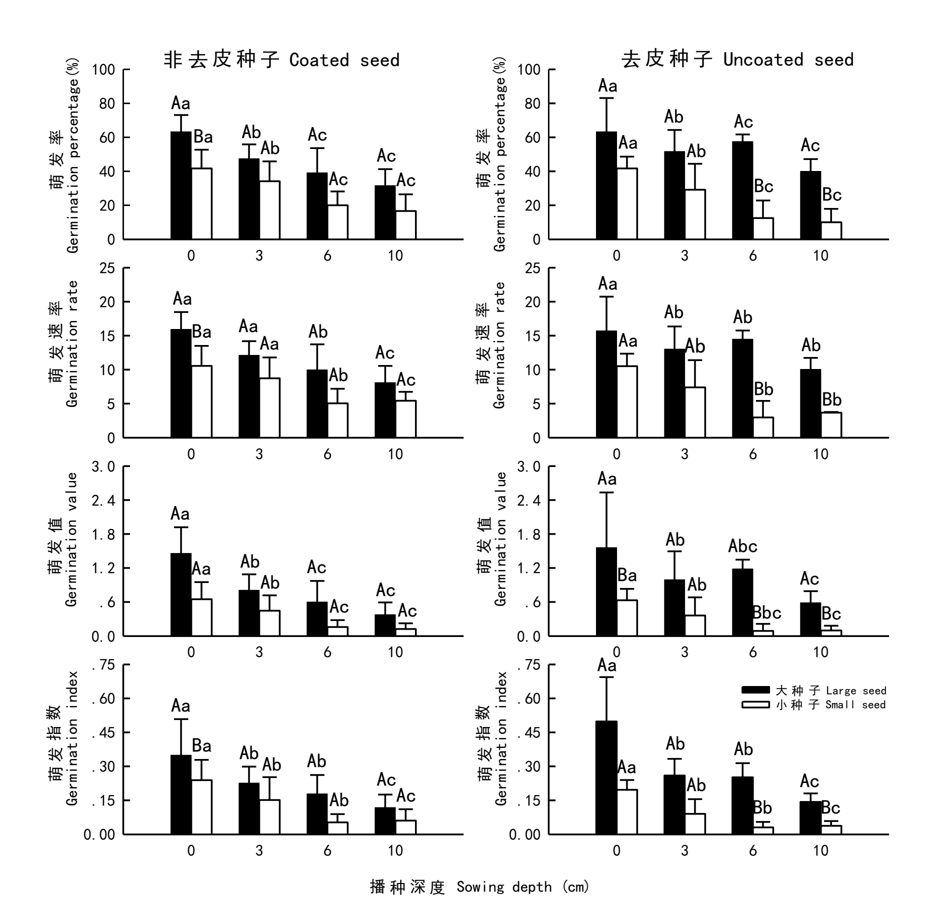
变量	萌发率 *GP*		萌发速率 *GR*		萌发值 *GV*		萌发指数 *GI*	
Variable	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*

SS	68.55	0.000	13.10	0.000	46.05	0.000	48.26	0.000
SC	0.57	0.455	0.15	0.580	0.57	0.454	0.19	0.229
SD	17.30	0.000	3.55	0.000	22.04	0.000	13.27	0.000
SS×SC	4.13	0.048	0.75	0.057	6.20	0.016	3.10	0.085
SS×SD	1.30	0.287	2.11	0.266	1.65	0.196	1.63	0.196
SC×SD	0.25	0.859	0.95	0.874	0.47	0.707	0.32	0.812
SS×SC×SD	0.94	0.429	1.19	0.416	0.48	0.692	0.43	0.735

非去皮大、小种子萌发速率均在 0 cm 播种深度最大，随播种深度增大而减小，在除 0 和 3 cm 外的其他播种深度间均显著差异(P<0.05)；大种子萌发速率均大于小种子，但不同大小种子间仅在 0 cm 播种深度差异显著(P<0.05)。与非去皮处理相比，同一播种深度下去皮大种子的萌发速率在所有播种深度均不同程度增大，而去皮小种子萌发速率略有降低。去皮大、小种子萌发速率在 0 cm 播种深度均显著高于其他播种深度(P<0.05)，随播种深度的增大持续减小(去皮小种子)或波动性减小(去皮大种子)；在 6 和 10 cm 播种深度，大种子均显著大于小种子(P<0.05)。

在同一播种深度，去皮大种子萌发值均不同程度增大，但去皮小种子萌发值均略有减小。非去皮种子萌发值在不同大小种子间均差异不显著，但去皮大种子在除 3 cm 外的其他播种深度均显著大于去皮小种子(P<0.05)。不论有无种皮，大、小种子萌发值在 0 cm 播种深度均显著大于其他播种深度(P<0.05)。

非去皮大、小种子萌发指数也均随播种深度增大逐渐减小，其在 0 cm 播种深度显著大于其他播种深度(P<0.05)，不同大小种子间在 0 cm 播种深度差异显著(P<0.05)。去皮大、小种子萌发指数在 0 cm 播种深度均显著大于其他播种深度(P<0.05)；不同大小种子间的差异在 6 和 10 cm 播种深度达显著水平(P<0.05)。萌发指数在有无种皮处理间差异不显著。



注：不同大写字母和不同小写字母分别表示同一播种深度的不同大小种子间和同一大小种子的不同播种深度间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different large and small letters indicate significant difference between seeds of different size within the same sowing depth and among different sowing depths within the same sized seed at P=0.05, respectively. The same below.

图 1 各类型辽东栎种子在不同播种深度的萌发率、萌发速率、萌发值和萌发指数

Fig. 1 Germination percentage, germination rate, germination value, and germination index of *Quercus wutaishanica* seeds of different types under different sowing depths

2.2 种子大小、种皮和播种深度对辽东栎幼苗生长的影响

种子大小和播种深度对除幼苗基茎外的其他生长参数均影响显著，种皮对根冠比外的其他生长参数影响显著；种子大小和种皮间的交互作用仅显著影响株高，种皮和播种深度间的交互作用、种子大小和播种深度间的交互作用均显著影响叶片数和单株叶面积，三者间的交互作用对所有生长参数的影响均未达显著水平(表 2)。

表 2　种子大小、种皮和播种深度对辽东栎幼苗生长影响的多因素方差分析
Tab. 2 Multi-way ANOVA of effects of seed size (SS), seed coat (SC) and sowing depth (SD) on the growth of *Quercus wutaishanica* seedlings

变量 Variable		株高 SH	基茎 BSD	叶片数 LN	单株叶面积 LAPP	总干质量 TDM	根冠比 RSR
SS	*F*	22.96	6.49	4.92	33.31	16.18	7.88
	P	0.000	0.051	0.031	0.000	0.000	0.007
SC	*F*	14.02	10.45	48.20	48.28	11.61	0.80
	P	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.374
SD	*F*	2.93	0.35	11.20	21.89	5.48	3.56
	P	0.043	0.791	0.000	0.000	0.006	0.021
SS×SC	*F*	7.30	3.98	3.16	2.59	0.34	0.28
	P	0.009	0.052	0.080	0.114	0.564	0.599
SC×SD	*F*	1.29	0.06	3.95	5.83	0.59	0.91
	P	0.290	0.979	0.010	0.002	0.622	0.446
SS×SD	*F*	1.08	1.02	4.91	3.70	0.60	0.49
	P	0.366	0.393	0.010	0.018	0.617	0.691
SS×SC×SD	*F*	1.62	0.35	0.21	2.18	0.67	1.15
	P	0.197	0.789	0.890	0.103	0.574	0.340

由图 2 可以看出，非去皮种子萌发幼苗的株高均随播种深度增大而减小，而在 10 cm 播种深度略有增大，不同播种深度间差异不显著；在除 10 cm 外的其他播种深度，大种子萌发幼苗株高均显著大于小种子(P<0.05)。去皮种子萌发幼苗株高均在 0 cm 播种深度最大，随播种深度增大逐渐减小，不同播种深度间差异不显著；在 0 和 10 cm 播种深度不同大小种子间差异显著(P<0.05)。去皮种子萌发幼苗基茎显著减小(P<0.05)。无论有无种皮，不同大小种子萌发幼苗基茎均随播种深度增大逐渐增大，但不同播种深度间和不同大小种子间均无显著差异。

不论有无种皮，不同大小种子萌发幼苗叶片数和单株叶面积都随播种深度增大逐渐减小。其中叶片数在非去皮处理的 0 和 3 cm 播种深度显著大于 6 和 10 cm 播种深度(P<0.05)，去皮处理的 0、3 和 6 cm 播种深度显著大于 10 cm 播种深度(P<0.05)；单株叶面积在非去皮处理的 0、3 和 6 cm 播种深度显著大于 10 cm 播种深度(P<0.05)，去皮处理的 0 cm 播种深度显著大于 6 和 10 cm 播种深度(P<0.05)。

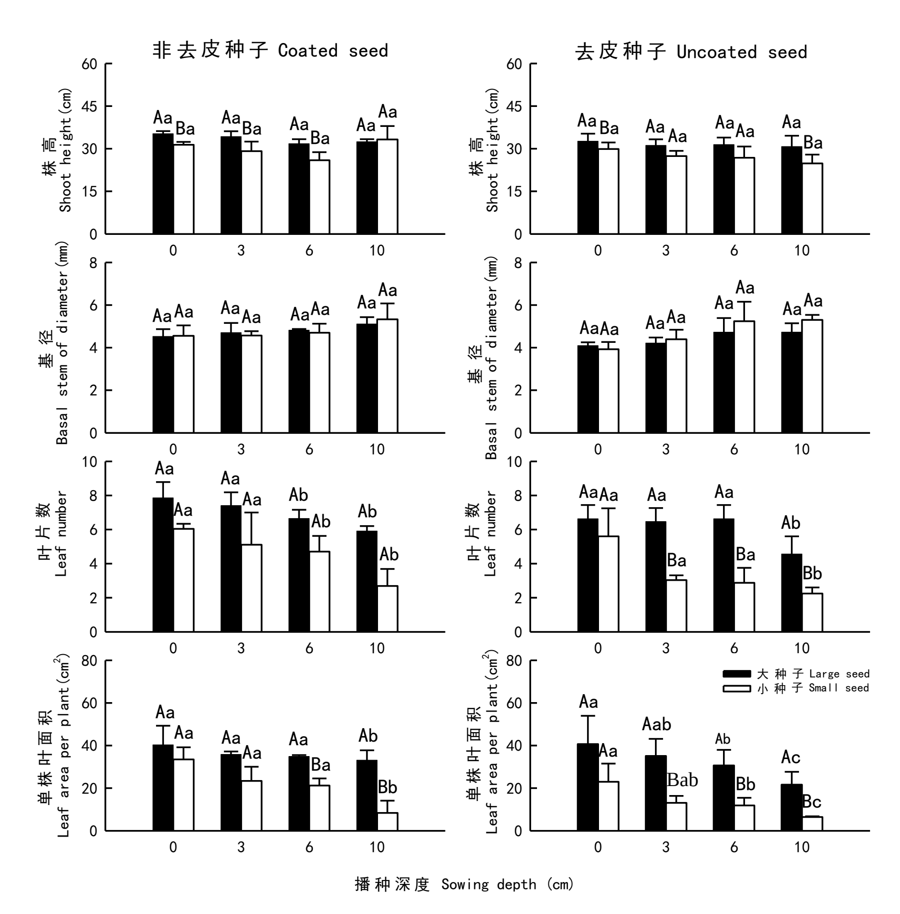


图 2 不同播种深度下各类型辽东栎种子萌发幼苗的株高、基茎、叶片数和单株叶面积

Fig. 2 Shoot height, basal stem diameter, leaf number and leaf area per plant of *Quercus wutaishanica* seedlings germinated from seeds of different types under different sowing depths

由图 3 可以看出，不论有无种皮，大、小种子萌发幼苗总干质量均随播种深度增大逐渐减小。对非去皮种子萌发幼苗来说，0 和 3 cm 播种深度显著大于 6 和 10 cm 播种深度(P<0.05)，不同大小种子萌发幼苗间的差异在除 0 cm 外的其他播种深度均差异显著(P<0.05)。而对去皮种子萌发幼苗来说，0 cm 播种深度显著大于 6 和 10 cm 播种深度(P<0.05)，不同大小种子萌发幼苗间的差异在所有播种深度均差异显著(P<0.05)。

去皮种子萌发幼苗根冠比在 0、3 和 6 cm 播种深度均大于非去皮种子萌发幼苗，但差异并不显著；无论有无种皮，根冠比均随播种深度增大逐渐减小，且在所有播种深度大种子均大于小种子，但不同大小种子间差异仅在非去皮处理的 10 cm 播种深度达显著水平(P<0.05)；非去皮种子萌发幼苗在 0 cm 播种深度显著大于 10 cm 播种深度(P<0.05)，去皮种子萌发幼苗在 0 和 3 cm 播种深度显著大于 10 cm 播种深度(P<0.05)。

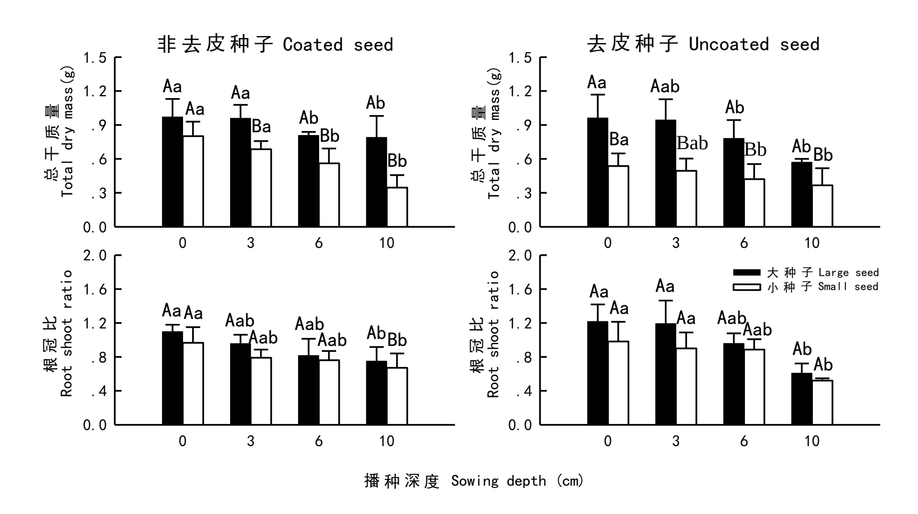


图 3 不同播种深度下各类型辽东栎种子萌发幼苗的总干质量和根冠比

Fig. 3 Total dry mass and root-shoot ratio of *Quercus wutaishanica* seedings germinated from seeds of different types under different sowing depths

3 讨论

植物在对环境的长期适应过程中，可调节同一植株内和不同植株间的结实量而产生大小各异的种子，大种子贮藏有更多的营养物质，对资源的竞争能力和抵御风险能力更强，小种子因质量较低而死亡风险较高(武高林和杜国祯, 2008)。大种子通常萌发优势更强(杨慧玲等, 2012; 郝海坤等, 2017)，但也有种子大小对萌发没有影响的报道(王桔红等, 2007)，甚至有研究发现小种子具有更强的萌发和出苗能力(Mole & Westoby, 2004)。本研究中，辽东栎大种子萌发率、萌发速率、萌发值和萌发指数在所有播种深度均高于小种子，其中非去皮大种子萌发率、萌发速率和萌发指数在 0 cm 播种深度均显著大于小种子，去皮大种子所有萌发参数在 6 cm 和 10 cm 播种深度都显著高于小种子。这些结果表明大种子贮藏的更多能量不仅可为种子顺利萌发和出苗提供了保障(Murray et al., 2003)，而且其萌发幼苗的生长势和对不良环境的抵抗能力更强(杨慧玲等, 2012)。

植物在异质生境中能否成功定居在很大程度上取决于早期建成幼苗的大小，而种子大小不仅直接影响早期建立幼苗的大小(何彦龙等, 2007)，而且对幼苗生长率具有重要影响(Merouani et al., 2001)。大种子贮藏的更多营养物质可确保幼苗的根系系统充分发育，增大根系的吸收面积或使根系向更高含水量的土层扩展，从而增大幼苗建立的机会(García-Cebrián et al., 2003)。本研究发现，非去皮大种子萌发幼苗株高在除 10 cm 的其他播种深度均显著大于小种子萌发幼苗，而去皮大种子萌发幼苗株高在所有播种深度均大于小种子萌发幼苗；不论有无种皮，大种子萌发幼苗叶片数、单株叶面积、总干质量和根冠比在所有播种深度均大于小种子萌发幼苗。杨慧玲等(2012)和郝海坤等(2017)分别以不同大小柠条

(*Caragana korshinskii*)和柚木(*Tectona grandis*)种子为材料的研究结论也与上述结果一致，有关其他乔木树种的研究也有类似报道(Coomes & Grubb, 2003; Kennedy et al., 2004)。产生上述结果的原因可能主要与大种子的营养物质贮藏更多有关，因为大种子萌发幼苗对光照和营养等资源的竞争能力更强，且具有更强的抵御不良环境的能力(何彦龙等, 2007)，从而对幼苗增补和种群更新贡献更大(Coomes & Grubb, 2003)。

种皮对种子吸胀或胚根突破种皮的机械障碍及其透性不良均直接种子的萌发(黄雍容等, 2009; 余婷等, 2017)，人工去除或损伤种皮可促进此类种子萌发(Hu et al., 2009; 闫兴富和曹敏, 2009)。对不能耐受过度脱水的顽拗性种子来说，种皮机械障碍引起的短暂休眠可能是其调节种子萌发的最佳时空分布的重要机制(闫兴富和曹敏, 2009)，栎属植物种子的胚根一端的种皮具有较厚的角质层和栅栏组织，种皮的这一特殊结构对种子萌发的机械障碍可使种子表现出一定程度休眠(Liu et al., 2005; 刘艳等, 2012)。本研究中，种皮对辽东栎种子萌发具有明显抑制作用，去皮大种子的所有萌发参数均不同程度增大，即种皮限制了种子的透水和透气性，从而抑制种子萌发。另一方面，栎属植物种子的种皮和子叶可能含有抑制种子萌发的物质，去皮处理不仅可排除种皮种的萌发抑制物质，而且有利于释放子叶中的萌发抑制物质，从而促进种子萌发；Rakić et al. (2006)和刘艳等(2012)报道的“用清水浸泡或去除种皮可促进栎属植物种子萌”的结论也可另一侧面为我们的上述结果提供佐证。去皮小种子萌发参数均略有降低可能与小种子失去种皮保护后更易于脱水或被微生物侵染而丧失活力有关，且栎属植物种子易于因本身寄生的真菌而引起腐烂(Bonner et al., 1987)。

种皮的保护作用在幼苗生长方面的结果更为明显，去皮种子萌发幼苗株高、基茎、叶片数、单株叶面积和总干质量均不同程度减小，表明种皮保护作用可一直延伸至幼苗建立后的早期生长阶段。辽东栎种子散落后的秋季萌发期间仅限于胚根伸长，翌年春季胚芽才开始伸长进入幼苗生长期，在种子萌发期间失去种皮保护必然会因子叶被微生物侵染而影响营养物质向幼苗主根转移，从而对幼苗生长产生影响。去皮种子萌发幼苗根冠比在 0、3 和 6 cm 播种深度均大于非去皮种子萌发幼苗，这些失去种皮保护并处于萌发阶段的“幼苗”为了避免子叶被微生物侵染或小型动物取食而引起致命性营养损失，会尽可能多地将子叶中贮藏的营养转移至主根，从而导致翌年胚轴伸长期营养供应亏缺而影响了地上部分的生长。然而，幼苗将子叶中的营养物质大量向主根转移是一种“风险防御策略”，这一策略可能因子叶营养物质的耗竭效应而影响幼苗茎的发育和地上生物量积累，因为在幼苗茎发育的最后阶段，其营养可能主要来源于子叶，而非主根(Kabeya & Sakai, 2003)。此外，播种过深可能会使胚轴穿过深厚土层时过度消耗子叶中的营养物质，甚至“透支”主根中的营养物质，因而去除种

皮和深播(10 cm 深度)的双重胁迫可能会导致幼苗根冠比减小。

播种深度直接影响种子所在土层的水分、光照和 O_2 供应状况而影响种子萌发。Guo et al. (2001)发现，锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)种子萌发率和出苗率都随埋藏深度增大而明显下降，播种过深或过浅都会影响种子萌发和出苗并导致更新失败。不同植物种子萌发对播种深度的反应差异较大，例如，秦岭冷杉(*Abies chensiensis*) (李庆梅等, 2008)和沙棘(*Hippophae rhmnoides*) (任珺等, 2012)种子的最大出苗率分别在 2 和 4 cm 播种深度；弗吉尼亚栎(*Quercus virginiana*)种子的适宜播种深度为 0～10 cm (宋以刚等, 2015)；另据 Nyandiga & Mcpherson (1992)报道，播种深度为 7.5 和 15 cm 时，亚利桑那白栎种子萌发率均高达 70%以上。本研究发现，不同大小辽东栎种子所有萌发参数均在 0 cm 播种深度最大，在 10 cm 播种深度最小，由于本研究是在光照相对较弱的遮阴棚下进行的，且试验过程中定期浇水，这在一定程度上排除了种子萌发遭受水分胁迫的风险，从而使种子 0 cm 播种深度也能够顺利萌发。幼苗生长方面的数据也从一个侧面佐证了这一推测，因为播种深度对种子萌发后幼苗的生长发育具有潜在影响(Guo et al., 2001)。

研究发现，不论有无种皮，不同大小种子萌发幼苗的株高、叶片数、单株叶面积、总干质量和根冠比等均随播种深度增大呈减小趋势，但基茎随播种深度增大而增大。表明辽东栎幼苗依赖子叶中的营养完成早期阶段发育后，地上部分生长和干物质积累主要取决于有效生长时间，播种过深引起的萌发推迟势必使幼苗有效生长时间缩短而对生长产影响；深播可改变辽东栎幼苗的生物量分配模式，促使幼苗分配更多的资源优先保证地上部分生长(王文娟等, 2011)，从而使根冠比随播种深度增大而减小，但当播种深度超过一定限度时，胚轴伸长因穿过的土层更深而增大幼苗的株高。幼苗在克服深层土壤阻力的缓慢生长过程中的过度横向生长可能是基径随播种深度增大而增大的主要原因，具体机制有待于深入研究。

参考文献：

BONNER FT, VOZZO JA, 1987. Seed biology and technology of *Quercus*. General Technology Report [R]. New Orleans, LA: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.

COOMES DA, GRUBB PJ, 2003. Colonization, tolerance, competition and seed-size variation within functional groups [J]. Trends Ecol Evol, 18(6): 283-291.

GARCÍA-CEBRIÁN F, ESTESO-MARTÍNEZ J, GIL-PELEGRÍN E, 2003. Influence of cotyledon removal on early seedling growth in *Quercus robur* L [J]. Ann For Sci, 60(1): 69-73.

GUO CR, LU JQ, YANG DZ, et al., 2009. Impacts of burial and insect infection on germination and seedling growth of acorns of *Quercus variabilis* [J]. For Ecol Manag, 258(7): 1497-1502.

GUO CR, WANG ZL, LU JQ, 2010. Seed germination and seedling development of *Prunus armeniaca* under different burial depths in soil [J]. J Forestry Res, 21(4): 492-496.

GUO K, LI R, WERGER MJA, 2001. Effect of acorn burying depth on germination, seedling emergence and development of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* [J]. Acta Bot Sin, 43(9): 974-978.

HAO HK, HUANG ZL, PENG YH, et al., 2017. Size variation and seedling growth characteristic of teak seed[J]. Seed, 36(1): 104-107. [郝海坤, 黄志玲, 彭玉华, 等, 2017. 柚木种子大小变异及小苗生长特性[J]. 种子, 36(1): 104-107.]

HE YL, WANG MT, DU GZ, 2007. Seed size effect on seedling growth under different light conditions in the clonal herb *Ligularia virgaurea* in Qinghai Tibet Plateau [J]. Acta Ecol Sin, 27(8): 3091-3098. [何彦龙, 王满堂, 杜国祯, 2007. 不同光照处理下青藏高原克隆植物黄帚橐吾(*Ligulariavirgaurea*)种子大小对其幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 27(8): 3091-3098.]

HU XW, WANG YR, WU YP, 2009. Effects of the pericarp on imbibition, seed germination, and seedling establishment in seeds of *Hedysarum scoparium* Fisch. *et* Mey [J]. Ecol Res, 24(3): 559-564.

HUANG YR, ZHUANG K, WU PF, et al., 2017. Seed germination and growth characteristics of *Cyclobalanopsis chungii* [J]. Chin J Ecol, 36(5): 1251-1258. [黄雍容, 庄凯, 吴鹏飞, 等, 2017. 福建青冈(*Cyclobalanopsis chungii*)种子萌发与生长特性[J]. 生态学杂志, 36(5): 1251-1258.]

KABEYA D, SAKAI S, 2003. The role of roots and cotyledons as storage organs in early stages of establishment in *Quercus crispula*: A quantitative analysis of the nostructural carbohydrate in cotyledons and roots [J]. Ann Bot, 92(4): 537-545.

KENNEDY PG, HAUSMANN NJ, WENK EH, et al., 2004. The importance of seed reserves for seedling performance: An integrated approach using morphological, physiological, and stable isotope techniques [J]. Oecologia, 141(4): 547-554.

LI QM, LIU Y, LIU GQ, et al., 2013. Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* [J]. Acta Ecol Sin, 33(7): 2104-2112. [李庆梅, 刘艳, 刘广全, 等, 2013. 栎属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究[J]. 生态学报, 33(7): 2104-2112.]

LI QM, XIE ZQ, SUN YL, 2008. Study on seedling adaptability of *Abies chensiensis* [J]. For Res, 21(4): 481-485. [李庆梅, 谢宗强, 孙玉玲, 2008. 秦岭冷杉幼苗适应性的研究[J]. 林业科学研究, 21(4): 81-485.]

LI WT, ZHANG C, WANG F, et al., 2010. Effects of sand burial and water supply on seedling growth of two dominant psammophytes in Mu us sandland [J]. Acta Ecol Sin, 30(5):1192-1199. [李文婷, 张超, 王飞, 等. 2010. 沙埋与供水对毛乌素沙地两种重要沙生植物幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 30(5):1192-1199.]

LIU Y, LI QM, LIU GQ, et al., 2012. Inhibitory mechanism of seed germination of *Quercus acutissima* [J]. Sci Silv Sin, 48(9): 164-170. [刘艳, 李庆梅, 刘广全, 等, 2012. 麻栎种子萌发的抑制机制[J]. 林业科学, 48(9): 64-170.]

LIU Y, QIU YP, ZHANG L, et al., 2005. Dormancy breaking and storage behavior of *Garcinia cowa* Roxb. (Guttiferae) seeds: Implications for ecological function and germplasm conservation [J]. J Integr Plant Biol, 47(1): 38-49.

MEROUANI H, BRANCO C, ALMEIDA MH, et al., 2001. Effects of acorn storage duration and parental tree on emergence and physiological status of Cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings [J]. Ann For Sci, 58(5): 543-554.

MOLES AT, WESTOBY M, 2004. Seedling survival and seed size: A synthesis of the literature [J]. J Ecol, 92(3): 372-383.

MURRAY BR, BROWN AHD, GRACE JP, 2003. Geographic gradients in seed size among and within perennial Australian *Glycine* species [J]. Aust J Bot, 51(1): 47-56.

NYANDIGA CO, MCPHERSON GR, 1992. Germination of two warm-temperate oaks, *Quercus emoryi* and *Quercus arizonica* [J]. Can J For Res, 22(9): 1395-1401.

RAKIĆ S, POVRENOVIĆ D, TEŚEVIC V, et al., 2006. Oak acorn, polyphenols and antioxidant activity in functional food [J]. J Food Eng, 74(3): 416-423.

REN J, TAO L, ZHAO YY, et al., 2012. Influences of sowing depth on survival and growth of *Nitraria tangutorum*, *Hippophae rhamnoides* and *Artemisia ordosica* in sandy lands along Qinghai-Tibet Railway [J]. J NW For Univ, 27(2): 17-17. [任珺, 陶玲, 赵迎迎, 等, 2012. 播种深度对青藏铁路沙区植物白刺、油蒿、沙棘存活和生长的影响[J]. 西北林学院学报, 27(2): 17-17.]

SONG YG, DENG M, WANG YT, 2015. Germination characteristics of *Quercus virginiana* seeds [J]. Chin J Ecol, 34(5): 1295-1300. [宋以刚, 邓敏, 王妍婷, 2015. 弗吉尼亚栎种子萌发特性[J]. 生态学杂志, 34(5): 1295-1300.]

SUN SC, CHEN LZ, 2000. Seed demography of *Quercus liaotungensis* in Dongling Mountain Region [J]. Chin J Plant Ecol, 24(2): 215-221. [孙书存, 陈灵芝, 2000. 东灵山地区辽东栎种子库统计[J]. 植物生态学报, 24(2): 215-221.]

TANG WD, WEI LY, MA QL, et al., 2017. Influences of different factors on the germination and seedling of *Agriophyllum squarrosum* [J]. J NW For Univ, 32(2): 156-161. [唐卫东, 魏林源, 马全林, 等, 2017. 不同因素对沙蓬种子萌发和出苗的影响[J]. 西北林学院学报, 32(2): 156-161.]

TAYLOR IN, WALKER SR, ADKINS SW, 2005. Burial depth and cultivation influence emergence and persistence of *Phalaris paradoxa*, seed in an Australian sub-tropical environment [J]. Weed Res, 45(1): 33-40.

WANG CY, ZHANG CH, LIU W, et al., 2011. Effects of seed mass on germination of Lamiaceae species in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Agr Sin, 19(4): 601-606. [王晨阳, 张春辉, 刘文, 等, 2011. 青藏高原东缘唇形科植物种子大小对萌发的影响研究[J]. 草地学报, 19(4): 601-606.]

WANG JH, CUI XL, CHEN XL, et al., 2007. Comparative study of seed germination, seed size and their relationships in mesad and siccocolous [J]. Chin J Plant Ecol, 31(6): 1037-1045. [王桔红, 崔现亮, 陈学林, 等, 2007. 中、旱生植物萌发特性及其与种子大小关系的比较[J]. 植物生态学报, 31(6): 1037-1045.]

WANG WJ, HE DH, TANG XQ, et al., 2011. Effects of different temperature and sand burial depths on seed germination and seedling growth of *Sophora moorcroftiana* [J]. J Desert Res, 31(6): 1437-1442. [王文娟, 贺达汉, 唐小琴, 等, 2011. 不同温度和沙埋深度对砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国沙漠, 31(6): 1437-1442.]

WU GL, DU GZ, 2008. Relationships between seed size and seedling growth strategy of herbaceous plant: A review [J]. Chin J Appl Ecol, 19(1): 191-197. [武高林, 杜国祯, 2008. 植物种子大小与幼苗生长策略研究进展[J]. 应用生态学报, 19(1): 191-197.]

YAN XF, CAO M, 2009 Effects of seed coat and environmental temperature on the germination of *Hevea brasiliensis* seeds [J]. J Trop Subtrop Bot, 17(6): 584-589. [闫兴富, 曹敏, 2009. 种皮和环境温度对橡胶树种子萌发的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 17(6): 584-589.]

YAN XF, QIU ZH, DU Q, et al., 2014a. Influences of seed coat and temperature on the germination of *Quercus wutaishanica* seeds [J]. J NW For Univ, 29(3): 119-124. [闫兴富, 仇智虎, 杜茜, 等, 2014a. 种皮和环境温度对辽东栎种子萌发的影响[J]. 西北林学院学报, 29(3): 119-124.]

YAN XF, QIU ZH, ZHANG Q, et al., 2014b. Effects of coat and sowing depth on seed germination and early seedling growth of *Quercus wutaishanica* [J]. Chin J Appl Ecol, 25(1): 53-60. [闫兴富, 仇智虎, 张嫱, 等, 2014b. 种皮和播种深度对辽东栎种子萌发和幼苗早期生长的影响[J]. 应用生态学报, 25(1): 53-60.]

YANG HL, LIANG ZL, ZHU XW, et al., 2012. Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of *Caragana korshinskii* Kom. (Fabaceae) [J]. Acta Ecol Sin, 32(24): 7757-7763. [杨慧玲, 梁振雷, 朱选伟, 等, 2012. 沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 32(24): 7757-7763.]

YU T, MENG LY, ZHANG HH, et al., 2017. Responses of *Quercus franchetii* to seed coat and different temperature in seed germination [J]. Seed, 36(7): 3-7. [余婷, 孟丽媛, 张辉红, 等, 2017. 锥连栎种子萌发对种皮和温度的响应[J]. 种子, 36(7): 3-7.]

ZHANG ZB, WAGN FS, 2001. Effect of burial on acorn survival and seedling recruitment of liaodong oak (*Quercus liaotungensis*) under rodent predation [J]. Acta Theriol Sin, 21(1): 35-43.